# 短时微重力下气泡尾流效应的动力学特性研究

齐宝金[1,2]，魏进家[1]，赵建福[3]，薛艳芳[1]

（1.西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室，西安 710049；2.西安交通大学化化学工程与技术学院，西安 710049；3.中国科学院力学研究所微重力重点实验室(国家微重力实验室)，北京，100190）

**摘　要：**实验研究了微重力环境中，不同热流密度时尾流效应对气泡动力学过程的影响。结果表明，微重力下气泡的尾流效应比常重力时更加明显，低热流密度时尾流对气泡动力学行为影响微弱，中高热流密度时尾流影响效果显著。尾流区内液体的水平流动促进了原生气泡间相互碰撞、合并过程，垂直加热面的流动则给气泡施加了向上的曳力，从而降低了气泡生长周期和脱离半径。尾流区内过冷液体的冷却作用使气泡内形成负压，液体从微柱结构内被吸入气泡底部，为其长大提供新鲜液体，避免局部干斑。尾流效应与微柱结构相互作用，能有效促进加热面的气泡合并和脱离过程，提高表面换热能力。

**关键词：** 尾流效应；池沸腾；微重力；动力学；微柱阵列结构

**中图分类号：** TK124　　　　**文献标识码：A**

## Dynamics Study on Bubble Wake Effect under Short Period of Microgravity

Qi Bao-Jin[1,2]　WEI Jin-Jia[1]　ZHAO Jian-Fu[3]　XUE Yan-Fang[1]

(1. State Key Laboratory of Multiphase Flow in Power Engineering, Xi’an Jiaotong University, Xi’an 710049, China;

2. School of Chemical Engeering and Technology, Xi’an Jiaotong University, Xi’an 710049, China;

3. Key Laboratory of Microgravity (National Microgravity Laboratory), Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** The influences of wake on bubble dynamics under various heat fluxes have been studied experimentally in microgravity. Results indicate that wake has little influence on bubble dynamics at low heat fluxes, but its effect on bubble dynamics is very greater at middle or high heat fluxes. More important, the bubble wake effect appears even more significant in microgravity. In the wake field, the horizontal flow of the liquid on micro-pin-finned silicon chips promotes the collision, coalescence and movement of bubbles, and the vertical flow of liquid phase can exert an upward force on bubbles, which can effectively shorten the growth cycle and decrease the departure radius of bubbles. Furthermore, subcooled liquid in wake field can create a negative pressure zone in bubbles and the fresh liquid can easily be inhaled into the micro-pin-finned structure covered by bubbles, which can supply sufficient liquid for the growth of bubble, avoiding film boiling. The interaction between the micro-pin-finned structure and the wake effect can promote the process of bubble coalescence and departure effectively, and then enhance heat transfer of micro-pin-finned surface.

**Key words:** wake effects; pool boiling; microgravity; dynamics; micro-pin-fin

## 0 前　言

核态池沸腾换热是一个具有很高传热系数的相变换热过程，气泡在加热表面的生长和脱离规律的动力学研究，对于揭示液体核态沸腾换热的有关机理具有重要意义，已经成为传热学科的前沿领域之一[1-3]。目前单个气泡的动力学研究已经取得了重要进展，理论上建立了多种不同模型，实验方面也积累了大量的实验数据[4-7]。但在考虑多个气泡之间相互作用方面还没有令人满意的结果，特别是在微重力环境中多个气泡的相互作用，迄今相关研究几乎是一片空白。通常情况下，当气泡长大到一定尺寸后，将会在浮力驱动下以一定速度脱离加热表面，气泡底部会形成一个低压区，称为尾流区。尾流区能够夹带周围其他颗粒随气泡向上运动，对核态沸腾换热过程影响显著。然而航天器在空间运行时处于微重力环境中，浮力作用被大大削弱，气泡在加热面停留时间延长，气泡脱离直径明显增大，脱离

基金项目：国家自然科学基金资助项目（No. 51306141; No. 51225601）；教育部高等学校博士学科点基金(No. 20120201120068)；中国科学院国家微重力重点实验室落塔资助项目

作者简介：齐宝金（1980- ）男，讲师，博士，主要从事相变换热相关研究。通信作者：魏进家，教授，jjwei@mail.xjtu.edu.cn

速度大幅降低，这对尾流区的温度场和速度场影响显著，尾流区域汽泡的动力学行为与常规重力环境相比会发生了很大变化。然而目前关于微重力条件下尾流对气泡动力学特性影响规律相关的实验和理论研究刚引起国内外学者的注意，相关报道较少。

本文利用中国科学院国家微重力实验室百米落塔平台提供的微重力环境，对微柱阵列结构表面进行了短时微重力池沸腾实验研究。重点对不同热流密度条件下汽泡的脱离程的动力学行为特性，特别是气泡脱离过程中尾流效应进行观察、对比和分析，以探讨相关因素对微重力核态沸腾传热的影响。

## 1 实验装置和测试过程

微重力池沸腾的实验装置主要由透明密封液池、测试装置、数据采集系统、图像采集系统、光源接口、电控制加热系统组成，如图 1 所示。池内装有约 3L 含溶解空气的 FC-72 作为实验工质，并与一个 3L 橡皮袋连通，以保证实验时容器内为标准大气压。测试芯片固定于液池底部，周围的空隙用环氧胶填充防止漏热，背面中心处和距芯片边缘处水平方向 20 mm、垂直方向 40 mm 处各布置一个 T 型热电偶，进行壁温($T_w$) 和主流液体温度($T_l$) 的测量。

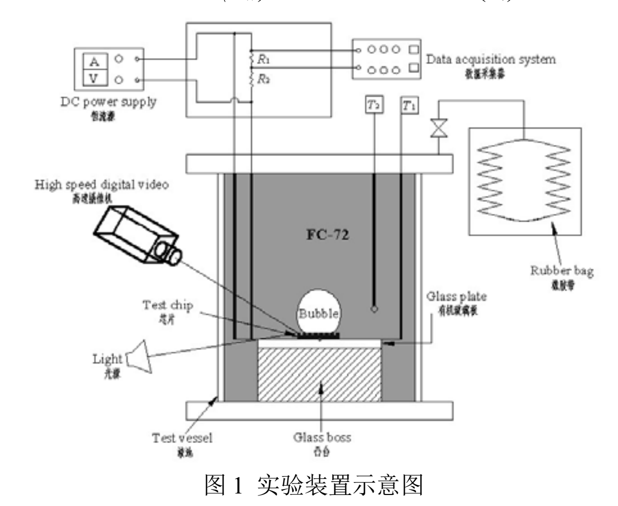
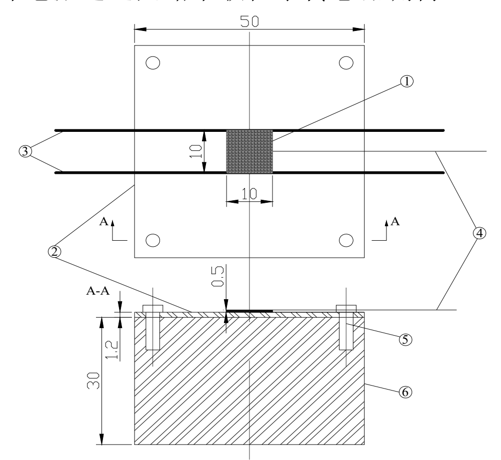



图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental apparatus

测试芯片为一边长为 10 mm, 厚度为 0.5 mm 的正方形掺磷 N 型硅片，比阻为 1.5Ω cm。为了强化沸腾换热，在芯片的表面采用干腐蚀的方法加工出方柱形微结构，其边长为 30 μm，高度为 60 μm 的方柱形微结构 PF30-60。其芯片的测试段如图 2 所示。在芯片的相对两侧分别焊接 0.25 mm 粗的铜导线，通过直流电源对芯片进行加热，芯片的加热量可由流经芯片的电流及加在芯片上电压得到。用环氧胶将测试芯片粘附在有机玻璃平板上（50×50×0.5 mm$^3$），测试表面周围的空隙同样用环氧胶填充。这就能够保证只有芯片的上表面能够有效地进行散热，并且这样的测试部件组合便于芯片的拆卸和更换。为了测得芯片两端电压，在电路中并联两个串联电阻（$R_1$=5 kΩ, $R_2$=100 kΩ），通过数采测得电阻 $R_1$ 的压降，根据标定关系得出测试芯片所加电压，流经测试芯片电流通过回路串联霍尔传感器测得。




①测试芯片 ②有机玻璃板 ③铜导线
④T 型热电偶 ⑤螺钉 ⑥有机玻璃凸台

图 2 测试段示意图

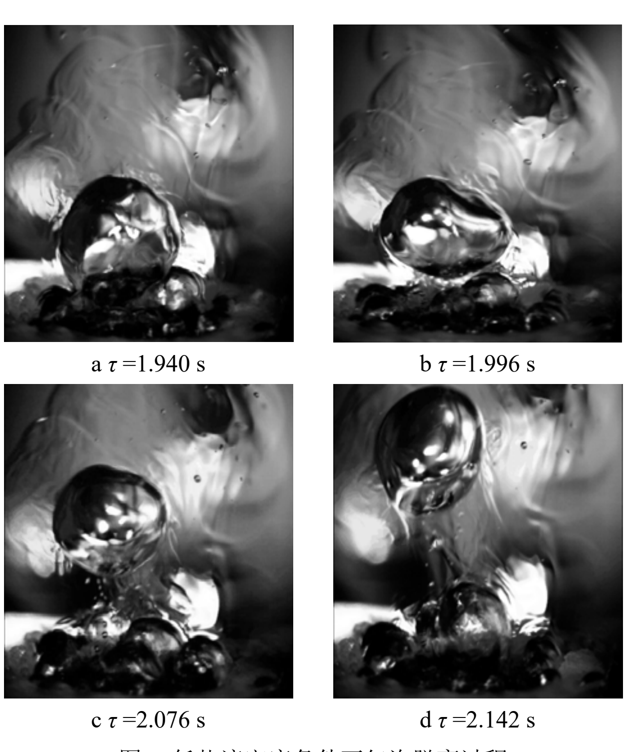
Fig. 2 Details of test section

## 2 实验现象和结果

在低热流密度条件下（$q$ = 12.53 W/cm$^2$），气泡从加热表面脱离前，主体保持规则的球形，并通过合并周围的原生气泡生长，如图 3(a) 所示。当气泡长大到脱落半径后脱离加热表面，气泡底部迅速回弹形成长轴平行于加热面的椭球形气泡，此时底部区域形成小范围的低压区，周围液体流入到气泡脱离和上升过程造成的容积空隙，形成尾流，如图 3（b）所示。尾流导致气泡周围的流体以一定的水平速度进入尾流区，由于尾流中的液体处于过冷状态，对加热表面的原生气泡起到冷却作用，导致壁面小气泡体积略有萎缩，之后，随着尾流影响的逐渐减弱，加热表面原生气泡又开始逐渐长大。在表面张力作用下，脱离气泡在上升过程中开始恢复球形，如图 3(c)，并在惯性力的作用下形成长轴在垂直于加热面的椭球，如图 3(d)，之后又收缩。气泡在尾流激起的往复震荡过程中缓慢上升，由于流体阻力的存在，震荡幅度逐渐收窄，但震荡周期基本维持恒定，约为 0.160 s。

由于加热表面的热流密度较低，气泡脱离半径相对较小（$R_d$ = 3.51 mm），形成的容积空隙也相对

较小，同时由于微重力环境中的浮力作用受到大幅削弱，气泡上升速度缓慢（$v$ = 0.037 m/s），导致尾流强度不大，影响时间有限（约持续 0.382 s），加之低热流密度下加热表面的原生气泡生长较慢，（生长周期为 1.240s），因此，原生气泡只有生长前期受尾流影响，气泡的生长周期和脱离直径基本无变化。



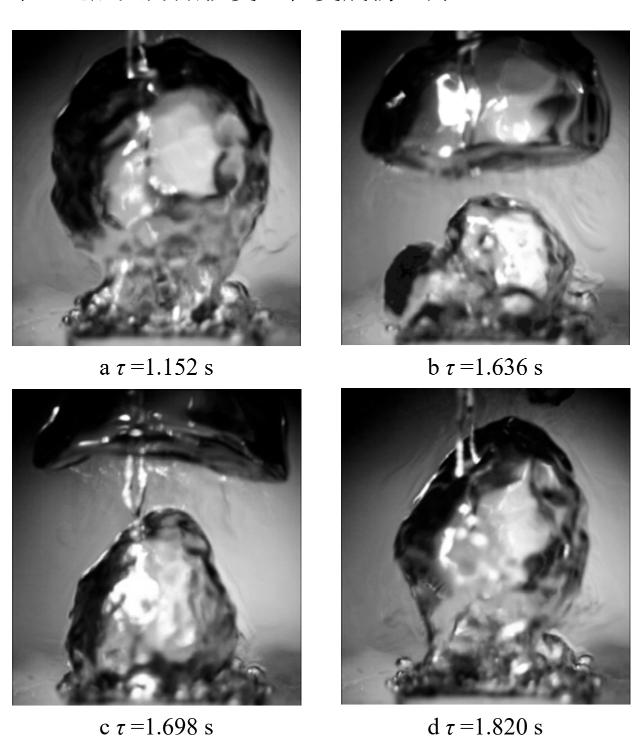
a $\tau$=1.940 s　b $\tau$=1.996 s

c $\tau$=2.076 s　d $\tau$=2.142 s

图 3 低热流密度条件下气泡脱离过程

Fig. 3 Departure process of bubbles at low heat fluxes

随着热流密度的增加（$q$ = 30.92 W/cm$^2$），加热表面呈剧烈的核态沸腾，气泡在加热表面生长的速度逐渐加快，气泡的脱离直径和脱离频率都较低热流密度时明显增大。气泡脱落前的动力学行为与低热流密度条件类似，整体保持较规则的球形，只是气泡底部与加热表面接触部分被略微拉长，形成一个与底部原生气泡的粘连区，大气泡通过与周围原生气泡合并长大，如图 4(a)。当气泡完全脱离加热表面后，底部迅速收缩并呈半球形，如图 4(b)，底部形成的低压区明显增大，尾流强度及影响时间都大幅提升，除周围过冷液体流入气泡上升和脱离过程造成的容积空隙外，底部的原生气泡也明显受到尾流影响。进入尾流区的过冷液体对原生气泡起到冷却作用，导致加热表面的原生气泡萎缩，这与低热流密度实验现象类似；同时，尾流对加热表面新的原生气泡起到一个向上提拉的作用，气泡被明显拉长而发生变形，如图 4(c)，这就使后一代气泡的整个生长周期都受到尾流作用的影响。对比未受尾流影响的气泡（图 4(a)）和受尾流作用后的气泡（图 4(d)）可以看出，受尾流效应的影响，气泡被拉长成椭球形，且在生长到脱离直径之前即离开加热表面，其体积仅为无尾流影响的 76%。脱离气泡近似为长轴在竖直方向的椭球，之后在表面张力作用下开始恢复成球形，又在惯性力作用下转变为长轴水平的椭球，之后又开始恢复，往复震荡上升。



a $\tau$=1.152 s　b $\tau$=1.636 s

c $\tau$=1.698 s　d $\tau$=1.820 s

图 4 中等热流密度条件下气泡脱离过程

Fig. 4 Departure process of bubbles at middle heat fluxes

随着热流密度进一步的提高（$q$ = 36.07 W/cm$^2$），气泡生长合并速率进一步加快。气泡从加热表面脱离前跟中等热流密度类似，保持球形，底部拉长并与加热表面的原生气泡粘连，如图 5(a)。当气泡脱离加热表面后，尾部收缩幅度更大，导致上升气泡变形更加剧烈，尾部产生更大的容积空隙，周围液体及底部原生气泡均被迅速吸入该区域。由于热流密度大，原生气泡生长速度快，在被吸入尾流区时与脱离气泡发生粘连，原生气泡被竖直拉长，呈蘑菇形状，但气泡未脱离加热表面，如图 5(b)所示。之后脱离气泡与原生气泡发生合并、相互贯通，在加热表面形成一个气柱，犹如从加热表面喷出的蒸汽射流一样，如图 5(c)所示。最后气柱尾部开始收缩，两代气泡同时完成脱离过程，如图 5(d)，下一轮新气泡的生长合并开始。此时，相应于高热流密度下的旺盛核态沸腾工况。当热流密度达到某一临界值，加热表面将会形成一个大气团并完全笼罩加热表面，

此时纯的核态沸腾工况结束，进入膜态沸腾。

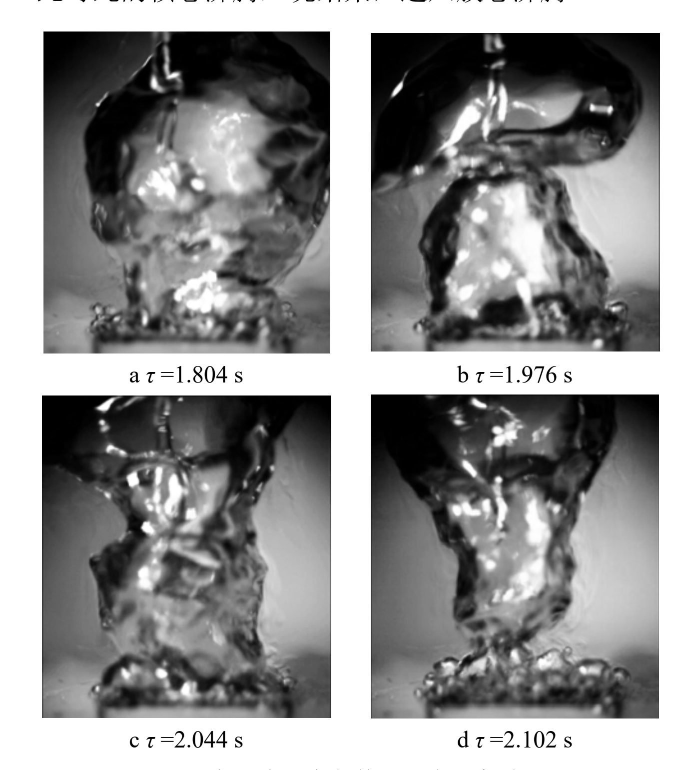



图 5 高热流密度条件下气泡脱离过程

Fig. 5 Departure process of bubbles at high heat fluxes

## 3 尾流强化微柱阵列结构换热机理分析

气泡在加热表面只有长大到脱离半径 $R_d$ 时才能从加热表面脱落，而气泡的长大动力主要来自于气泡底部的微液膜的蒸发，以及与周围气泡的合并。然而在微重力条件下，浮力大幅削弱，气泡脱离动力不足，特别是在较高热流密度时，气泡往往还未长大到脱离尺寸，底部液膜已经消耗殆尽又无法得到有效补充，进而导致局部干斑出现，使传热过程显著恶化。通过在加工微柱阵列结构能够有效避免加热表面出现干斑，表面换热系数和临界热流密度都有大幅提高[8-10]。

气泡外新鲜液体通过微柱阵列结构形成的微通道进入气泡底部来维持蒸发，使气泡能够顺利长大到脱离半径，然后从加热表面脱离。此时，由于气泡半径较常规重力时的脱离半径大 1~2 个数量级，气泡尾部形成较为强烈的尾流。周围过冷液体以一定速度进入尾流区，对原生气泡进行冷却，同时尾流增加了加热表面液体的扰动，强化了表面换热，如图 6 所示。当过冷液体进入气泡脱离产生容积空隙过程中，也为表面小的气泡横向移动提供动力，提高了加热表面气泡间的合并几率，加快了气泡的生长速度。

气泡在加热表面横向移动所需能量可表示为：

$$FA_r = \gamma_{sv}A_r - \gamma_{sl}A_r - \gamma_{vl}A_{vl} \quad (1)$$

由于微柱阵列结构的存在，气泡横向移动所消耗的能量也较光滑表面低，尾流效应产生的水平流动更加明显。更为重要的是，尾流区的容积空隙会对原生气泡产生一个竖直向上的作用力，这会在原生气泡内部产生一个负压，新鲜液体将会通过微柱结构表面相互连通的微通道吸入气泡底部加热面，从而使气泡底部蒸发液得到供给。尾流效应与微柱阵列结构本身产生的毛细效应共同作用，为原生气泡长大提供新鲜液体，能有效避免气泡底部出现干斑导致的传热恶化现象。

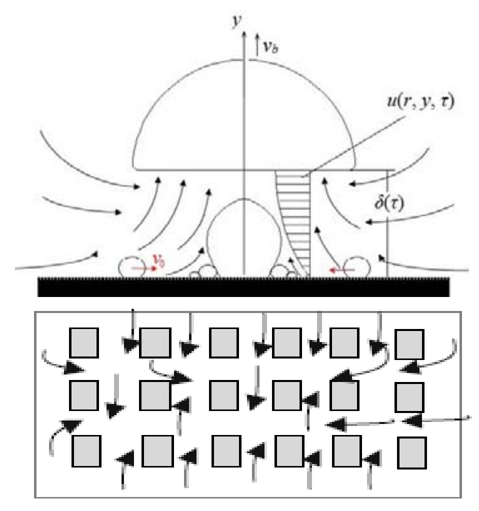



图 6 微柱阵列结构表面的尾流区

Fig. 6 Wake field on micro-pin-finned structure

气泡尾流区的流场分析对揭示尾流强化微柱结构传热的动力学机理至关重要，本文以中等热流密度为例，对典型尾流区流场内的气泡动力学行为进行分析。假定气泡上升过程呈半球形，上升速度为 $v_b$，当不考虑气泡上浮过程中加速度的影响，即气泡在上浮的过程中只考虑受到浮力和粘性阻力的作用时，可计算得到半径为 $r$ 的球形气泡上浮的速度为：

$$v_b = \sqrt{\frac{8}{3}\frac{rg_{\mu}(\rho_l - \rho_v)}{\rho_l C_D}} \quad (2)$$

设气泡尾流中液体以水平速度 $u(r, y, \tau)$ 进入，去填补气泡脱离和上升所造成的容积空隙。此时尾流区的厚度为 $\delta(\tau)$，上升气泡底部液体流速为 $U(r, \tau)$，以及尾流区的厚度 $\delta(\tau)$。尾流区内水平速度分量 $u(r, y, \tau)$的分布满足如下形式的表达式[11]：

$$\frac{u(r,y,\tau)}{U(r,\tau)} = 2\xi - 3\xi^3 + \xi^4 \quad (3)$$

其中 $\zeta = y / \delta(\tau)$，由于尾流作用的影响区域有限，设

尾流区的最大厚度为$\delta_{max}$，即认为当上升气泡距离加热表面距离大于 $\delta_{max}$ 后，即忽略其对底部新生气泡的影响，可以认为尾流影响区的最大厚度等于气泡直径，这样可以计算得到尾流影响时间 $\tau$ 可表示为：

$$\tau = \frac{2R_d}{v_b} \tag{4}$$

假设原生汽泡通过气泡底部微液层蒸发生长，则气泡长大速率与微液层蒸发速率相当，则 $\tau$ 时刻气泡半径可表示为：

$$r_0(\tau) \approx 2.5 \frac{Ja^{1/2}}{pr} (v_l \tau)^{1/2} \tag{5}$$

尾流对加热表面气泡作用效果与尾流强度和气泡生长速率密切相关，当尾流强度较低，且气泡生长速率缓慢时，尾流对气泡生长和脱离影响微弱。如果原生气泡能在尾流影响时间 $\tau$ 内生长到脱离半径脱离尺寸，或者原生气泡长大速率接近气泡脱离气泡的上升速率，那么气泡将持续受到尾流作用，气泡生长周期和脱离半径都会下降。当热流密度更大时，气泡相互贯通形成连续气柱，尾流现象仅沸腾初期存在，之后基本消失。

## 4 结　论

微重力环境下气泡的尾流效应比常规重力时效果更加明显，但尾流效应对加热表面的原生气泡的影响效果与尾流强度、持续时间、以及气泡生长速率都密切相关。低热流密度时尾流对气泡动力学行为影响微弱，中等热流密度时尾流影响效果显著，高热流密度时仅初期出现尾流现象。进入尾流区的过冷液体对原生气泡有冷却作用，尾流区的原生气泡内会形成负压，使液体从微柱结构表面进入气泡底部，尾流效应与微柱阵列结构本身产生的毛细效应共同作用，为原生气泡长大提供新鲜液体。同时尾流区内液体的水平流动促进了原生气泡间相互合并过程，垂直加热表面的流动则给气泡施加了一个向上的作用力，使气泡生长周期和脱离半径都有所降低。总之，气泡的尾流效应与微柱阵列结构相互作用，在一定热流密度范围内，能够有效促进加热表面的气泡合并和脱离过程，提高表面换热能力。

## 参考文献

[1]. Straub Johannes, Boiling heat transfer and bubble dynamics in microgravity [J]. Advances in Heat Transfer, 2001, 35: 57--172.

[2]. Di Marco Paolo, Grassi Walter, Effects of external electric field on pool boiling: Comparison of terrestrial and microgravity data in the ARIEL experiment [J]. Experimental Thermal and Fluid Science, 2011, 35(5): 780--787.

[3]. Chang J Y, You S M, Heat orientation effects on pool boiling of micro-porous-enhanced surfaces in saturated FC-72 [J]. ASME Journal of Heat Transfer, 1996, 118: 937--943.

[4]. Chang J Y, You S M, Enhanced boiling heat transfer from micro-porous surfaces: effects of a coating composition and method [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1997, 40: 4449--4460.

[5]. WEI Jinjia, Guo Liejin, Honda H, Experimental study of boiling phenomena and heat transfer performances of FC-72 over micro-pin-finned silicon chips[J]. Heat Mass Transfer, 2005, 41(8): 744--755.

[6]. WEI Jinjia, Honda H, Effects of fin geometry on boiling heat transfer from silicon chips with micro-pin-fins immersed in FC-72[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2003, 46: 4059--4070.

[7]. MA Aixiang, Wei Jinjia, Yuan Minzhe, et al. Enhanced flow boiling heat transfer of FC-72 on micro-pin-finned surfaces [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, 52: 2925--2931.

[8]. WEI Jinjia, Zhao Jianfu, Yuan Minzhe, et al. Boiling Heat Transfer Enhancement by Using Micro-pin-finned Surface for Electronics Cooling [J]. Microgravity Science and Technology, 2009, 21: S159--S173.

[9]. 薛艳芳，魏进家，赵建福，等. 微重力下光滑表面上 FC-72 的池沸腾实验研究[J].工程热物理学报，2011, 32(3): 423--426.

XUE Yanfang, Wei Jinjia, Zhao Jianfu, et al. Experimental Study of Pool Boiling of FC-72 over Smooth Surface under Microgravity [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2011, 32(3): 423--426.

[10]. XUE Yanfang, Zhao Jianfu, Wei Jinjia, et al. Experimental Study of Nucleate Pool Boiling of FC-72 on Smooth Surface under Microgravity [J] Microgravity Science Technology, 2011, 23: S75--S85.

[11]. Ali A Judd. An analytical and experimental investigation of bubble waiting time in nucleate boiling [J]. J. Heat Transfer, 1981, 103: 673-678.

通讯作者：魏进家

通讯地址：陕西省西安市咸宁西路 28 号西安交通大学动力工程多相流国家重点实验室

手机号码：13072958698

电话：029-82664462

电子邮箱：jjwei@mail.xjtu.edu.cn